УДК 519.25

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ЕГИПТА В РАЙОНЕ ВОЗВОДИМОЙ АЭС "ЭЛЬ-ДАБАА"

А. И. Зайцев, С. М. Дмитриев, А. А. Куркин, Е. Н. Пелиновский (НГТУ им. Р. Е. Алексеева, Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород; Специальное конструкторское бюро автоматизации морских исследований, Дальневосточное отделение РАН, г. Южно-Сахалинск)

Необходимость оценки опасности цунами на побережье Египта возникла в связи со строительством атомной станции "Эль-Дабаа" (координаты 28,5270° в.д., 31,1032° с.ш.), тендер на который выиграла российская корпорация "Росатом". Для анализа долговременной опасности цунами использован популярный в настоящее время метод РТНА, основанный на статистическом анализе большого числа реальных и прогностических землетрясений с последующим расчетом волн цунами от возможных землетрясений. Показано, что предсказываемый уровень подъема воды в районе АЭС составляет 6 ± 2 м на период 10 тыс. лет.

Ключевые слова: цунами, долговременный прогноз, АЭС, Египет.

Введение

Исторические данные о проявлении цунами в Египте собраны в каталоге [1] за период 4 тыс. лет (2000 г. до н. э. — 2000 г. н. э.). Кратко перечислим эти события, ссылаясь также на другие источники:

- 1380 г. до н. э. Извержение вулкана Санторин. Разрушительное цунами достигло Египта: "Вода пришла с севера, поднялся огромный поток и затопил всю страну".
- 365 г. н. э. Землетрясение на Крите. Вызвало цунами в Ливии, Александрии и Малой Азии. В Александрии "вода отступила на большое расстояние, унеся корабли. А затем она перелилась через дамбу". Около 700 человек утонуло (по другим данным 5 тыс.). Подробные сведения об этом землетрясении и цунами приведены в статье [2].
- **746 г. н. э.** Разрушительное землетрясение в Сирии. Волны наблюдались в Ливане и Египте.
- **881 г. н. э.** Цунами в Палестине и Египте. В Александрии поднялась вода и унесла корабли. Вода поднялась в реке Нил и залила берега.

- **1034 г.** Сильное землетрясение на территории от Сирии до Египта. О волнах цунами сообщается в Израиле; скорее всего, они были и в Египте.
- **1068 г.** Событие, аналогичное произошедшему в 1034 г.
- **1202 г.** Сильное землетрясение в Палестине. В Египте ощущалось на большой площади. О цунами сообщается в Сирии, но предполагается, что оно проявилось в Египте.
- 1303 г. Катастрофическое землетрясение в восточной части Средиземного моря. Его магнитуда оценивается примерно в M = 8. Много разрушений в Каире. В Александрии поднявшаяся вода унесла французский корабль вглубь суши. На реке Нил вода затопила берега на 15 м. Много людей погибло.
- **1863 г.** Разрушительное землетрясение на острове Родос в Эгейском море. Оно ощущалось в Александрии и Суэце. Сведения о цунами вблизи Египта неопределенные.
- **1870 г.** Сильное землетрясение в восточной части Средиземного моря. Ощущалось в Александрии и Каире. В новом порту Александрии наблюдался всплеск воды.
- **1886 г.** Очень сильное землетрясение в Ионическом море. Ощущалось в Египте и Сирии.

Волны цунами наблюдались вплоть до Измир (Турция).

1908 г. Землетрясение и цунами в Мессине (Италия). Существуют свидетельства, что заметные волны цунами достигли побережья Ливии и западного берега Египта, вплоть до Александрии.

Источники наиболее значительных событий представлены на карте (рис. 1), взятой из статьи [3]. Три цунами обусловлены землетрясениями в Греции, и одно пришло из Италии.

Инструментальные данные регистрации цунами в Египте отсутствуют, хотя в работе [4] упоминается существование мареограммы цунами в Александрии после разрушительного землетрясения 1956 г. в Эгейском море (магнитуда 7,5). Однако, существует мареограмма этого же цунами в Яффе (Израиль) с максимальной высотой 28 см; она опубликована в статье [5]. Судя по оценкам спектров мареограмм, сделанных в [4], высота волны в Александрии была меньше, так что это цунами можно отнести к незначительным.

Анализ имеющихся данных

Итак, всего существует 13 событий за 4 тыс. лет, что позволяет указать верхний предел периода повторяемости волн цунами в 300 лет. Видно, однако, что имеющаяся база данных очень неполна, и, скорее всего, в ней много пропусков. Тем не менее ряд событий (1380 г. до н. э., 365, 881, 1303 гг. н. э.) свидетельствует о больших цунами в этом районе. По оценкам из этого каталога, интенсивность цунами сейсмических событий (365, 881 и 1303 гг.) $I \geq 3$, что в соответствии с формулой Соловьёва [6, 7]

$$I = \frac{1}{2} + \log_2 H$$

дает высоту цунами $H \ge 6$ м. Даже если считать, что таких событий было всего три за 2 тыс. лет, то получается, что примерно раз в 600—700 лет может быть разрушительное цунами высотой более 6 м. Если говорить об очень катастрофических землетрясениях и цунами в 365 и 1303 гг., то их повторяемость получается равной одному разу в тысячу лет. Очевидно, что опасностью цунами в таких условиях нельзя пренебрегать.

Имеется также большое количество работ по цунами в Средиземном море, где изучаются конкретные события и обсуждаются цунамигенные зоны, связанные с сейсмической, оползневой и вулканической активностью. Во многих из них Египет упоминается вскользь, и нужную информацию не всегда легко добыть. Особо отметим обзорную статью [8], в которой обсуждаются все



Рис. 1. Источники наиболее сильных исторических цунами в Египте [3]

вопросы, связанные с геофизикой волн цунами в Средиземном море. Приведем здесь карту цунамигенных зон в Средиземном море, которая важна для понимания опасности цунами в Египте (рис. 2, см. также цветную вкладку). Как видно, наиболее цунамигенная зона находится в Греции, она достаточно далека от Египта и экранируется островом Крит. Поэтому волны цунами, приходящие из этой зоны, будут по высоте сравнимы с волнами, приходящими из менее интенсивных зон. Наиболее опасные для Египта очаги цунами находятся около Крита (с его двух сторон); эти зоны достаточно интенсивны и близки по расстоянию к Египту. Именно там находились очаги цунами 365 и 1303 гг., о которых уже упоминалось. Отметим, что положение цунамигенных зон очень хорошо коррелирует с данными наблюдений для побережья Египта, представленными на рис. 1.

Из числа работ по моделированию конкретных событий, имеющих определенное отношение к Египту, упомянем наиболее позднюю работу [9]. В ней содержатся расчеты исторического цунами 365 г., которое было очень катастрофическим (см. сводку цунами во Введении). Его магнитуда оценивается в M = 8,2, а его эпицентр на рис. 2 (см. также цветную вкладку) находится в левой зоне относительно острова Крит (см. также рис. 1). Параметры очага неизвестны, поэтому в работе [9] выбрано несколько различных сценариев развития сейсмического процесса и результаты расчетов суммированы (разными цветами) на рис. 3 (см. также цветную вкладку) для побережья Египта. Как видим, высота цунами может достигать 7 м в близкой окрестности к месту строительства АЭС, хотя в районе станции рассчитанная высота волн $H \approx 3$ м. Здесь приводятся данные о высоте волн, а не об ам-



Рис. 2. Цунамигенные зоны в Средиземном море, опасные для Египта [8]



Рис. 3. Распределение рассчитанных высот волн цунами 365 г. вдоль Египта [9]

плитудах. В [9] указано, что в Александрии положительная амплитуда волны (на глубине около 5 м) достигает почти 2,5 м, а отрицательная почти 3 м. Большие значения рассчитанных высот волн коррелируют с описанием катастрофических последствий этого цунами в Египте.

Вероятностный анализ возможных высот волн

Самый простой вариант получения вероятностных оценок высот цунами — это статистический анализ уже прошедших событий, по аналогии с анализом ветровых волн. Для цунами, однако, ряд наблюдений в фиксированном береговом пункте всегда мал, и это хорошо видно из приведенной во Введении сводки. В некоторых случаях удается объединить наблюдения в нескольких близких пунктах по определенной технологии, названной двухпараметрической схемой цунамирайонирования. Она использовалась для предварительной оценки высот цунами на Тихоокеанском побережье России на период до 100 лет [10]. Для этого необходимо большое число измеренных высот в целом для большого участка побережья, хотя в каждом конкретном пункте число измерений может быть малым. Как видно из приведенных выше данных, для всего побережья Египта число исторических цунами очень мало и недостаточно для количественного анализа, так что этой технологией воспользоваться нельзя. В таких случаях часто используют сценарный подход, рассматривая максимально возможные землетрясения и рассчитывая высоты волн цунами. Такой подход реализован для оценки высот цунами на Дальнем Востоке России [11, 12]. При этом не всегда ясна вероятность появления такого экстремального события.

В настоящее время широкое распространение получил метод РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment — вероятностная оценка опасности цунами). В его основе лежит статистический анализ возможных землетрясений, число которых достаточно велико, с последующим расчетом волн цунами от них [13, 14]. Такой анализ был выполнен для американского штата Орегон [15] и, позднее, Средиземного моря [16]. В настоящее время он применяется в Институте вычислительных технологий СО РАН для оценок долговременной опасности цунами на Дальнем Востоке России. Именно этот подход использован в описываемых исследованиях.

Для вероятностных оценок выбраны только цунами сейсмического происхождения. Несейсмические источники должны быть рассмотрены отдельно. На первом этапе необходим каталог землетрясений, составленный по единому стандарту. Такой каталог за последнюю тысячу лет для Средиземного моря приведен в [17]. Он использован в [16] для создания синтетического каталога потенциальных цунамигенных землетрясений на следующие 100 тыс. лет. В нем сохраняются те же распределения магнитуд и механизмов очага, что и в каталогах реальных событий. Землетрясения рассматривались как случайный пуассоновский процесс с периодичностью, определяемой из формулы Гутенберга— Рихтера. С помощью того же закона определялась магнитуда каждого события. Синтетический каталог содержит 84920 землетрясений с магнитудой M > 6,5 на период 100 тыс. лет. Пространственное распределение землетрясений за период в 10 тыс. лет показано на рис. 4 (см. также цветную вкладку). Цвет характеризует различные механизмы в очаге, на чем останавливаться не будем [16]. Как видно, очаги цунами полностью покрывают Эгейское море и расположены относительно близко от Египта.

Моделирование цунами для каждого случая выполнено [16] в рамках теории мелкой воды с использованием батиметрии GEBCO 08, переформатированной к разрешению в 2' (около 3,6 км). Расчеты ведутся до изобаты в 50-100 м (это примерно 75 м в окрестности АЭС). Последние морские точки маркируются, начиная с г. Бензани в Ливии, — всего 32 точки вдоль Египетского побережья. Координаты этих точек заданы в базе данных. Точка 17 наиболее близка к месту возведения АЭС "Эль-Дабаа", ее координаты 28,5270° в.д., 31,1032° с.ш. Для сопоставления выбраны и соседние точки 16 (27,9932° в.д., 31,1366° с.ш.) и 18 (29,0608° в.д., 31,0030° с.ш.). Эти точки представлены на карте (рис. 5). Часть расчетов была повторена авторами данной статьи.

Затем высоты волн пересчитываются на берег с помощью известного закона Грина [6]

$$H_R = H_0 \left[\frac{h_0}{h_R}\right]^{1/4},$$

где H_0 — положительная амплитуда волны на глубине h_0 , получаемая из численных расчетов по уравнениям мелкой воды; H_R отождествляется с высотой наката волны на берег; значение h_R берется равным 1 м. Коэффициент усиления волны в береговой зоне при перепаде глубин от 75 до 1 м составляет ~ 2,9.

Ниже будем использовать уже рассчитанный в [16] банк высот наката цунами вдоль побережья Египта. Число рассчитанных высот волн, превышающих 1 мм, в точке 17 составляет 58 294. Это достаточный объем данных для получения статистически значимых результатов.

Частота повторяемости цунами f определяется как число событий с высотой волн, превышающей заданное значение, деленное на временной интервал (в данном случае 100 тыс. лет). Рассчитанная частота повторяемости цунами для береговой точки 17 показана на рис. 6.



Рис. 4. Пространственное распределение эпицентров потенциальных цунамигенных землетрясений за 10 тыс. лет



Рис. 5. Положение последних морских точек, в которых рассчитаны высоты волн цунами



Рис. 6. Частота повторяемости цунами (в логарифмическом масштабе) как функция высоты в точке 17

Максимально рассчитанная высота цунами в точке 17 составляет 11,46 м, следующая по высоте волна — меньше 9 м, последующие — меньше 8 м. Основной же массив данных составляют малые высоты волн цунами от удаленных землетрясений, не представляющие опасности. Поэтому были выделены цунами с высотами более 1 м, которые могут представлять опасность для АЭС и прилегающей территории. Для таких событий уже применимы методы экстремальной статистики, в частности, подходящей аппроксимацией частоты повторяемости, показанной на рис. 7, является экспоненциальная кривая (распределение Гумбеля первого типа)

$$\lg f = -0.2755H - 2.359,\tag{1}$$

где единица измерения частоты повторяемости — год⁻¹, а высоты — м. Для построения регрессии использованы интервал 1—9 м и коэффициент корреляции $R^2 = 0,985$. Отсюда уже можно оценить средний период повторяемости цунами различной высоты. В частности, волна с высотой 2,3 м встречается раз в тысячу лет, а с высотой 6 м — раз в 10 тыс. лет.

Предполагая пуассоновский характер распределения цунами большой амплитуды, можно оценить вероятность превышения заданной высоты в заданный промежуток времени (обеспеченность):

$$P(H,t) = 1 - \exp\left(-f(H)t\right),$$

где f(H) определена формулой (1) (останавливаться на этом не будем).



Рис. 7. Частота повторяемости цунами с высотой более 1 м в точке 17: — расчеты; - - - - значение по формуле (1)

Сопоставим расчетные значения частот повторяемости цунами в точках, соседних с местом строительства АЭС. На рис. 8 представлены рассчитанные значения частот повторяемости для трех точек: 16, 17 и 18, показанных на карте (см. рис. 5). Как видно, частоты повторяемости различаются между собой. Это сразу видно по наибольшим событиям. Так, если в точке 17 максимальная высота волны составляет 11,4 м, то слева от нее на расстоянии около 3,6 км максимальная высота равна 17 м, а справа на таком же расстоянии — 6,5 м. Различия в частотах повторяемости становятся заметными уже при высотах 1 м и более, что лучше видно на рис. 9. Раз-



Рис. 8. Рассчитанные частоты повторяемости цунами вблизи места строительства АЭС: - - - точка 16; — - точка 17; - · - точка 18



Рис. 9. Рассчитанные частоты повторяемости цунами вблизи места строительства АЭС (удалены точки с высотами меньше 1 м): - - - точка 16; — точка 17; – · – точка 18

брос в предсказываемых высотах волн на период в тысячу лет составляет 1,8—2,5 м, а на период в 10 тыс. лет — от 4,5 до 6,5 м. Вообще говоря, сильная изменчивость высот волн вдоль побережья в других регионах хорошо известна как по историческим данным, так и по данным расчетов и объясняется влиянием топографии прибрежной зоны и направленностью излучения цунами.

Интересно сопоставить рассчитанные высоты волн с имеющимися в литературе для других пунктов Египта. Так, в статье [18] предсказываемые высоты волн в Александрии составляют 1,5 м на тысячу лет и 2,6 м на 10 тыс. лет. В Порт-Саиде предсказываемые высоты волн значительно больше: 3 м на тысячу лет и около 5 м на 10 тыс. лет. Эти результаты основаны на меньшем количестве расчетов и, скорее всего, занижены, если судить по данным наблюдений в Александрии.

Заключение

Простой анализ наблюдений цунами в Египте за последние 2 тыс. лет свидетельствует, как минимум, о двух случаях (365 и 1303 гг.) с высотами волн, превышающими 6 м. Повторяемость таких цунами грубо оценивается в тысячу лет. Эти данные наблюдений относятся к Александрии, измеренные высоты волн в районе Эль-Дабаа отсутствуют. Если использовать данные уже имеющихся численных расчетов этих катастрофических событий и им верить, то в 365 и 1303 гг. высота волн в районе Эль-Дабаа была около 4 м [9, 19]. Проведенный авторами вероятностный анализ приводит к высоте волн 6 м на период в 10 тыс. лет. При суммировании исторических данных и результатов расчетов в районе АЭС кажутся вполне реальными высоты волн цунами в интервале 4—8 м на период около 10 тыс. лет. Разумеется, эта оценка носит предварительный характер, поскольку основана на расчетах волн цунами на достаточно грубой сетке.

Данное исследование поддержано грантом Российского фонда фундаментальных исследований 18-05-80018 (программа "Опасные явления").

Список литературы

Соловъёв С. Л., Го Ч. Н., Ким Х. С., Соловъёва О. Н., Щетников Н. А. Цунами в Средиземном море: 2000 до нашей эры – 1991.
М.: Межведомственный геофизический комитет, 1997.
Soloviev S. L., Solovieva O. N., Go Ch. N., Kim Kh. S. Shehetnikov N. A. Trupomis in

Kim Kh. S., Shchetnikov N. A. Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B. C. - 2000 A. D. Hagerstown: Kluwer, 2000.

- Pararas-Carayannis G. The earthquake and tsunami of July 21, 365 AD in the Eastern Mediterranean Sea — Review of impact on the Ancient World — Assessment of recurrence and future impact // Science of Tsunami Hazards. 2011. Vol. 30, No 4. P. 253—292.
- Salamon A., Rockwell T., Ward S. N., Guidoboni E., Comastri A. Tsunami hazard evaluation of the Eastern Mediterranean: Historical analysis and selected modeling // Bulletin of the Seismological Society of America. 2007. Vol. 97, No 3. P. 705-724.
- Van Dorn W. G. Tide gage response to tsunamis. Pt II: other oceans and smaller seas // J. Physical Oceanography. 1987. Vol. 17. P. 1507—1516.
- Beisel S., Chubarov L., Didenkulova I., Kit E., Levin A., Pelinovsky E., Shokin Y., Sladkevich M. The 1956 Greek tsunami recorded at Yafo, Israel, and its numerical modeling // J. Geophysical Research. 2009. Vol. 114. P. C09002.

- Пелиновский Е. Н. Гидродинамика волн цунами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. *Pelinovskiy E. N.* Gidrodinamika voln tsunami. Nizhniy Novgorod: IPF RAN, 1996.
- Левин Б. В., Носов М. А. Физика цунами. М.: Янус-К, 2005. Levin B., Nosov M. Physics of Tsunamis. Doetinchem: Springer, 2009.
- Papadopoulos G. A., Gracia E., Urgeles R., Sallares V., De Martini P. M., Pantosti D., Gonzalez M., Yalciner A. C., Mascle J., Sakellariou D., Salamon A., Tinti S., Karastathis V., Fokaefs A., Camerlenghi A., Novikova T., Papageorgiou A. Historical and pre-historical tsunamis in the Mediterranean and its connected seas: Geological signatures, generation mechanisms and coastal impacts // Marine Geology. 2014. Vol. 354. P. 81–109.
- Lobkovsky L., Mazova R., Tyuntyaev S., Remizov I. Features and problems with historical great earthquakes and tsunamis in the Mediterranean Sea // Science of Tsunami Hazards. 2016. Vol. 35, No 3. P. 167–188.
- Го Ч. Н., Кайстренко В. М., Пелиновский Е. Н., Симонов К. В. Количественная оценка цунамиопасности тихоокеанского побережья СССР // Тихоокеанский ежегодник. Владивосток, 1988. С. 9—17. Go Ch. N., Kaistrenko V. M., Pelinovsky E. N., Simonov K. V. A quantitative estimation of tsunami hazard and the tsunami zoning Scheme of the Pacific Coast of the USSR // Pacific Annual. Vladivostok, 1988. P. 7—15.
- 11. Куркин А. А., Пелиновский Е. Н., Чой Б., Ли Дж. С. Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования // Океанология. 2004. Т. 44, № 2. С. 179—188. Kurkin A., Pelinovskii E., Choi B. H., Lee J. S. A Comparative estimation of the tsunami hazard for the Russian Coast of the Sea of Japan based on numerical simulation // Oceanology. 2004. Vol. 44, No 2. P. 163—172.
- Бейзель С. А., Гусяков В. К., Чубаров Л. Б., Шокин Ю. И. Численное моделирование воздействия удаленных цунами на дальневосточное побережье России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, № 5. С. 578—590

Beisel S. A., Gusiakov V. K., Chubarov L. B., Shokin Yu. I. Numerical simulation of the action of distant tsunamis on the Russian Far East coast // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. Vol. 50, No 5. P. 508-519.

- Geist E. L., Parsons T. Probabilistic analysis of tsunami hazards // Natural Hazards. 2006. Vol. 37. P. 277—314.
- Grezio A., Babeyko A., Baptista M. A., Behrens J., Costa A., Davies G., Geist E. L., Glimsdal S., Gonzalez F. I., Griffin J., Harbitz C. B., LeVeque R. J., Lorito S., Lovholt F., Omira R., Mueller C., Paris R., Parsons T., Polet J., Power W., Selva J., Sorensen M. B., Thio H. K. Probabilistic Tsunami Hazard Analysis (PTHA): Multiple sources and global applications // Reviews Geophysics. 2017. Vol. 55. P. 1158—1198.
- 15. Gonzalez F. I., Geist E. L., Jaffe B., Kanoglu U., Mofjeld H., Synolakis C. E., Titov V. V., Arcas D., Bellomo D., Carlton D., Horning T., Johnson J., Newman J., Parsons T., Peters R., Peterson C., Priest G., Venturato A., Weber J., Wong F., Yalciner A. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources // J. Geophysical Research. 2009. Vol. 114. P. C11023.
- Sorensen M. B., Spada M., Babeyko A., Wiemer S., Grunthal G. Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea // Ibid. 2012. Vol. 117. P. B01305.
- 17. Grunthal G., Wahlstrom R. The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium // J. Seismology. 2012. Vol. 16, No 3. P. 535-570.
- Tobias J., Stiassnie M. Synthetic tsunamis along the Israeli coast // Phil. Trans. R. Soc. A. 2012. Vol. 370. P. 1677–1686.
- Hamouda A. Z. Numerical computations of 1303 tsunamigenic propagation towards Alexandria, Egyptian Coast // J. African Earth Sciences. 2006. Vol. 44. P. 37—44.

Статья поступила в редакцию 24.01.19.

PROBABILISTIC ASSESSMENT OF THE DANGER OF A TSUNAMI ON THE COAST OF EGYPT IN THE AREA NEAR "EL DABAA" NPP UNDER CONSTRUCTION / A. I. Zaytsev, S. M. Dmitriev, A. A. Kurkin, E. N. Pelinovsky (NSTU n. a. R. E. Alekseev, Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod; Special Research Bureau for Automation of Marine Researches, Far East Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk).

The need to assess the danger of tsunami at Egyptian shore was brought with the construction of "El Dabaa" NPP (coordinates $28.5270 \circ E$, $31.1032 \circ N$); Russian corporation Rosatom won the tender for its construction. To do a long-term tsunami threat analysis, we used a currently widely used PTHA method based on statistical analysis of a great number of real and forecasted earthquakes followed up with computations on tsunami waves resulted from the earthquakes. It is shown that the predicted level of the water rise in the region of the NPP makes 6 ± 2 m for the period of 10 thousand years.

Keywords: tsunami, long-term forecast, NPP, Egypt.